



Progetto: “Ottimizzazione di Percorso Utensile per la Prototipazione Rapida FDM per la realizzazione di Protesi Ossee”:

Stato del progetto nei primi 10 mesi di attività

Gregorio Franzoni

Area Modellazione Geometrica e Tecniche Monte Carlo (Gemms)

Servizio Energia ed Ingegneria di Processo (EIP)

CRS4

Abstract

Questo documento riassume lo stato del progetto nei primi 10 mesi di attività. Un aspetto trasversale a tutto il progetto riguarda lo studio delle tecniche di modellazione geometrica solida che sono alla base del presente progetto di ricerca. Questo ambito necessita di conoscenze approfondite di programmazione in linguaggio di alto livello e di grafica computerizzata. Per questa ragione una parte significativa dell'attività è stata rivolta agli aspetti formativi sulla programmazione avanzata (linguaggio C) ed al suo utilizzo nella modellazione geometrica solida. Questa attività ha complementato gli aspetti più specifici legati al progetto che hanno riguardato lo studio delle tecniche di Prototipazione Rapida per la Prototipazione Vascolare.

1. Modellazione solida ed elementi di programmazione in linguaggio C

Nei primi due mesi di lavoro al CRS4 mi sono dedicato a migliorare la mia formazione relativamente alla programmazione in linguaggio C, in particolare il suo uso nell'ambito della modellazione geometrica solida. Gli scopi specifici di questa fase sono stati: approfondire la mia conoscenza del linguaggio stesso e prendere confidenza con alcuni tipi di strutture dati (alberi binari, liste) e metodi di visita tramite funzioni ricorsive e apprendere i fondamenti della modellazione geometrica. Sulla base del codice sviluppato esplorerò la possibilità di effettuare riempimenti di sezioni piane dei solidi ottenuti, simulando il movimento dell'utensile del sistema RP Stratasys su un dominio bidimensionale, dapprima

molto semplice (esempi: cerchio, quadrato) e successivamente più complesso (esempi: domini costituiti da più parti disgiunte, domini che presentano vuoti al proprio interno). Il risultato di questa attività consiste nello sviluppo di un prototipo di un modellatore geometrico. I dettagli di questa attività sono descritti in:

1. G. Franzoni. "Modellatore CSG", *Technical Report, CRS4-TECH-REP ID: 03/22, Aprile 2003*.

2. Prototipazione vascolare

Nel mese di Giugno 2002 ho iniziato a collaborare all'attività che ha come scopo la realizzazione, in scala reale, di un modello che riproducesse il lume di un'arteria umana, nella fattispecie un segmento di carotide, a partire dai dati acquisiti attraverso una tomografia (TAC). Lo scopo era definire una pipeline completa che permetta, partendo dai dati di una acquisizione TAC, di giungere alla realizzazione di un modello materiale dell'organo in questione mediante prototipazione rapida a tecnologia FDM in un tempo dell'ordine di poche ore (3 – 5 h).

Le fasi del processo identificate sono le seguenti: dai dati della TAC viene ricostruita la geometria del segmento di arteria mediante un software di segmentazione immagini e ricostruito, nelle tre dimensioni, utilizzando il software Open Cascade. L'entità geometrica viene poi convertita in un formato detto Stereolitografia (STL), che è il formato "canonico" di lavoro per tutte le tecnologie di Prototipazione Rapida (RP). Tale file viene opportunamente elaborato mediante un software di tipo CAM, che estrae dall'oggetto una serie di sezioni orizzontali (operazione chiamata *slicing*) e determina i percorsi utensile necessari all'operazione di stampa 3D delle sezioni. Il file viene quindi esportato in un formato specifico per la tecnologia RP che si intende utilizzare. Nel nostro caso, il formato è l'SML. A questo punto il file viene inviato alla macchina, che costruisce il pezzo strato per strato. La figura seguente mostra le fasi di preparazione alla prototipazione ora descritte, nel caso di un tratto di arteria ricostruito a partire dal *dataset* di una TAC eseguita su una carotide umana.

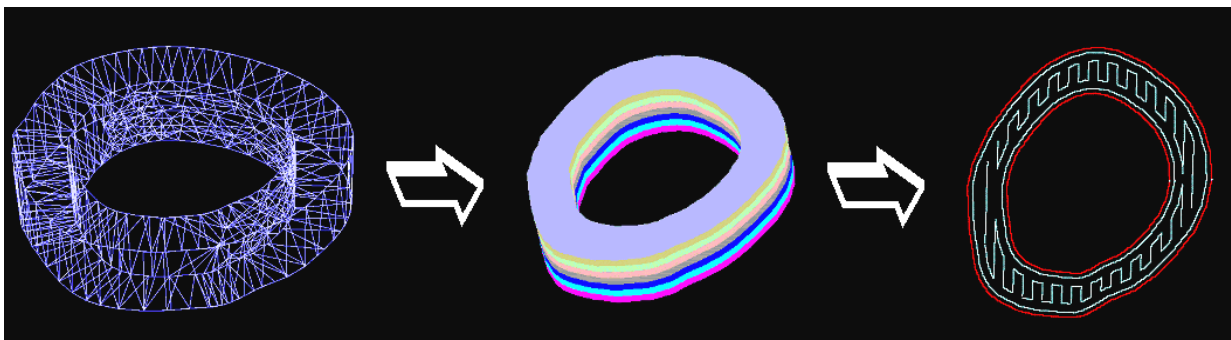


Figura 1. In sequenza: formato STL, operazione di *slicing*, percorsi utensile su una sezione orizzontale (SML).

Il mio contributo al lavoro ora descritto è stato il seguente:

- ho collaborato, insieme agli altri ricercatori del progetto LAPS coinvolti nell'attività di ricostruzione vascolare, nella determinazione del file STL a partire dal modello Open Cascade. Nello specifico, abbiamo affrontato e risolto alcuni problemi relativi alla gestione della triangolazione del modello;

- ho eseguito diverse realizzazioni materiali del modello per verificarne la correttezza. Ho prodotto modelli della porzione di carotide in scala 2:1 e in scala 1:1, con diversi spessori degli strati e con diverse direzioni di crescita del modello, al fine di determinare le modalità che portassero, anche a giudizio dei medici coinvolti nel progetto, alla riproduzione più fedele possibile del lume reale dell'arteria. Date le dimensioni ridotte dell'oggetto (la lunghezza del segmento riprodotto è di circa 30 mm, per un diametro interno di circa 4 mm), alcune versioni sono state realizzate in due parti, separabili nel senso della lunghezza, per poterne agevolmente esaminare la superficie interna.

Le immagini che seguono, come pure quelle della Figura 1, sono tratte dall'articolo [2].



Figura 2. Da sinistra: le prime tre immagini rappresentano alcuni dei prototipi di carotide umana menzionati sopra, realizzati con tecnologia FDM; l'immagine a destra mostra un confronto tra l'immagine della sezione acquisita mediante RM (immagine bianca sullo sfondo) e la simulazione della sua produzione, attraverso una sovrapposizione del file SML su di essa.

I risultati di questa attività sono descritti nei due seguenti articoli:

1. F. Murgia, G. Pusceddu e G. Franzoni. "Open Cascade and Rapid Prototyping in Human Carotid Lumen Reconstruction", *Atti del primo convegno Eurographics Italian chapter. CRS4-TECH-REP ID: 02/37, Luglio 2002.*
2. P. Pili, F. Murgia, G. Pusceddu, G. Franzoni and M. Tuveri. "Physical human lumen carotid reconstruction: life-size models by rapid prototyping", *To appear in Medical Imaging 2003, San Diego (CA) February 2003.*

3. Attività formativa e collaborazioni scientifiche

Nell'ambito della modellazione geometrica, ho seguito un corso di formazione interna dal titolo *Linguaggio C e Schema CSG*, tenuto dal Dott. Piero Pili nei mesi di Maggio e Giugno 2002. Nell'ambito delle tecniche di campionamento statistiche, ho seguito un corso di statistica, organizzato in collaborazione tra l'area GEMS del CRS4 e Università di Cagliari tenuto dal Prof. Bertolino e Prof. Racugno dell'Università di Cagliari e dalla Dott.ssa Mira, dell'Università dell'Insubria, di Varese. Il corso, tenutosi in parte presso la Facoltà di Ingegneria dell'Univ. di Cagliari (teoria) ed in parte presso i laboratori informatici del CRS4 (applicazioni al calcolatore), verteva sulle Simulazioni di Monte Carlo e sulle Catene di Markov.

Nel contesto dell'acquisizione di conoscenze riguardo agli aspetti topologici nella costruzione di repliche anatomiche, mi sono recato dal 7 al 15 settembre in missione scientifica presso l'Università de Haute Alsace (UHA) a Mulhouse, Francia, insieme al Prof. Renzo Caddeo, responsabile del Corso di Perfezionamento in Grafica Computerizzata per la Modellazione di Oggetti Geometrici del Dipartimento di Matematica dell'Università di Cagliari, che collabora al progetto, per conferire con il Professor Francois Apery, docente di Topologia Algebrica alla Faculté de Science et Technique dell'UHA, esperto nella costruzione di modelli matematici e materiali di superfici dalla forma notevolmente complessa, riguardo ai problemi di topologia esposti in precedenza. Egli si è dimostrato interessato all'argomento, e dalle nostre discussioni è emerso che sono presenti punti d'incontro tra il nostro campo di ricerca e gli argomenti di Topologia Algebrica e modellazione di cui egli si occupa. Il Prof. Apery ha ultimato di recente il modello di una superficie, costruito con fili d'acciaio armonico fissati su una intelaiatura di ottone, il cui scopo è quello di rendere evidente la possibilità di costruire modelli di superfici sfruttando certe proprietà meccaniche dell'acciaio armonico. Il lavoro è stato pubblicato sul libro "Mathematics and Arts", edito da Springer Verlag. Durante il soggiorno sono stato ospite del gruppo di ricerca coordinato dal Prof. Robert Lutz, docente di Geometria Differenziale nella medesima Università, con il quale ho discusso di possibili applicazioni della ricerca qui presentata.

4. Dottorato in Matematica

Nel mese di Gennaio 2003 ho iniziato il Dottorato in Matematica presso l'Università di Cagliari. In Marzo è cominciato il primo ciclo dei Corsi rivolti ai dottorandi, su argomenti generali di Analisi e Geometria. Nell'arco dei tre anni previsti per la sua durata conto di svolgere un'attività articolata a grandi linee nella maniera seguente:

- approfondire le conoscenze e le competenze su argomenti di Geometria Differenziale (in particolare Geometria delle Curve e delle Superfici), di Topologia Generale e di Topologia Algebrica.
- individuare tra gli argomenti sopraelencati quelli più strettamente legati alle problematiche di modellazione solida di cui mi occupo attualmente al CRS4 (Curve e Superfici BSpline, NURBS, metodi per la ricostruzione boundary di solidi e superfici, metodi di incollaggio di patch bidimensionali, nozioni di topologia specifiche per gli spazi digitali) ed acquisire competenze specifiche in tal senso, con il supporto diretto del Dott. Piero Pili del CRS4 e del Gruppo di Geometria Riemanniana del Dipartimento dell'Università di Cagliari coordinato dal Prof. Renzo Caddeo.

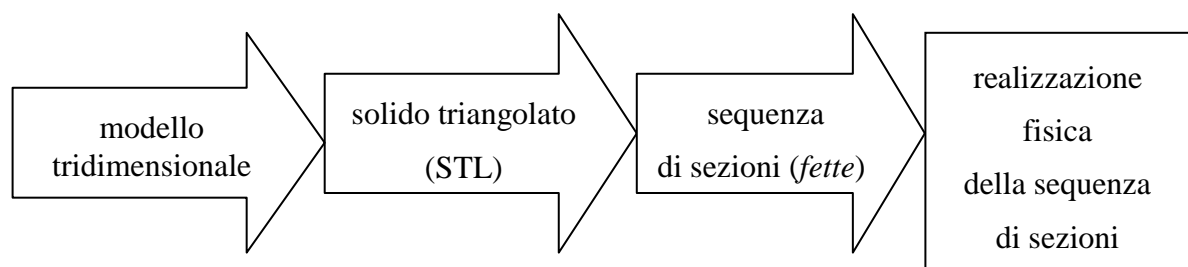
5. Lavoro futuro

I risultati del primo anno di attività testimoniano che siamo in grado di utilizzare le tecnologie RP allo stato dell'arte per replicare parti anatomiche con tecnologia tradizionale. Lo scopo della ricerca finale individuato è la definizione di una pipeline di produzione di prototipi vascolari e ossei che permetta di realizzare i modelli fisici utilizzando esclusivamente sezioni, senza passare per la rappresentazione tridimensionale della frontiera (boundary) del solido 3D. Nelle prossime righe esporrò in dettaglio la natura generale del problema, ne focalizzerò i punti critici ed esporrò i risultati conseguiti finora e le attuali direzioni di ricerca.

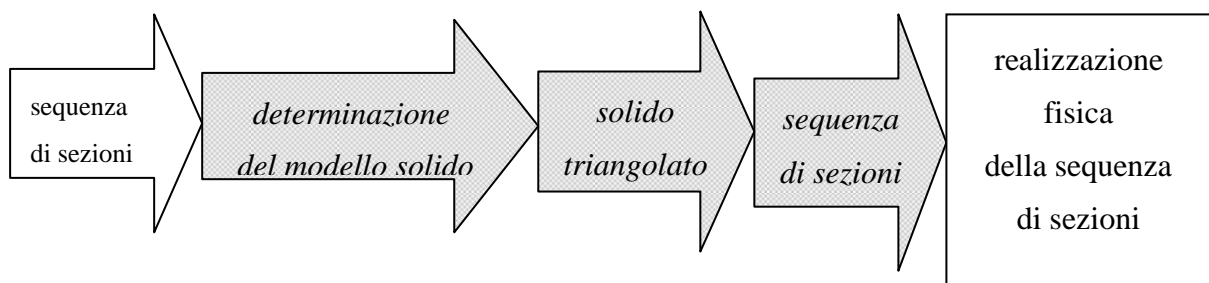
Tutte le tecniche di RP attualmente in uso utilizzano la pipeline seguente:

- si parte da un modello solido prodotto al CAD o definito mediante nuvola di punti acquisiti con tecnica di *reverse engineering*;
- si definisce una triangolazione boundary del modello solido e la si esporta in formato STL (tutti i CAD 3D dell'ultima generazione esportano in questo formato);
- si effettua uno *slicing* del file STL, determinando un insieme di linee spezzate chiuse, che individuano un certo numero di sezioni (fette) del modello. In maniera automatica, ma con il controllo dell'utilizzatore, vengono determinati eventuali *supporti*, che sono parti aggiunte, necessarie in fase di stampa, che verranno levate a produzione ultimata;
- si procede alla determinazione dei percorsi utensile, detti *roads*, che realizzano il riempimento delle sezioni. Il formato prodotto al termine di questa fase è quello che viene inviato alla macchina hardware (il prototipatore), e contiene tutte le informazioni necessarie alla produzione fisica del pezzo;
- si effettua la stampa, e al termine di questa si asportano i supporti dal pezzo stampato;

Sottolineiamo la sequenza di passaggi:



La pipeline di produzione delle repliche anatomiche, ossee e vascolari, *ha già come punto di partenza un set di fette*, che è l'insieme delle immagini ottenute dalla TAC. Lo schema seguente evidenzia quindi la presenza di passaggi inutili (in grigio) che andrebbe seguita utilizzando il processo tradizionale:



Un siffatto processo di determinazione dei percorsi utensile da inviare al prototipatore, oltre ad essere lungo e ridondante, può portare ad una significativa perdita di informazioni. E' quindi naturale tentare di eliminare i passaggi intermedi, conservando solo il primo e l'ultimo, ovvero rendere possibile la produzione *diretta* delle sezioni provenienti dalle immagini TAC.

L'analisi approfondita di questo problema ha evidenziato difficoltà di vario genere, ma i punti cruciali su cui è necessario concentrare gli sforzi risultano essere tre:

1. rivedere gli aspetti relativi alla *segmentazione* delle immagini TAC, ovvero come elaborare opportunamente i set di pixel in modo da estrarre le informazioni (anche topologiche oltre che geometriche) che definiscono le sezioni da realizzare fisicamente;
2. conoscere lo stato dell'arte degli algoritmi di riempimento di domini bidimensionali, sia boundary che volumetrici, con particolare attenzione a quelli che utilizzano il Raycast;
3. comprendere a fondo e risolvere i problemi relativi alla ricostruzione di una topologia tridimensionale coerente partendo da sezioni bidimensionali dell'oggetto da riprodurre;

Nei prossimi mesi, il mio impegno sarà concentrato su questi tre punti. In particolare, in collaborazione con il gruppo di Geometria Riemanniana del Dipartimento di Matematica dell'Università di Cagliari, affronterò i problemi di carattere topologico.

Riguardo ai punti 1 e 3, una parte consistente del lavoro sarà costituita da due obiettivi principali:

1) miglioramento delle mie conoscenze sulle tecniche di segmentazione di immagini, ovvero individuazione, nelle immagini mediche risultanti da acquisizioni TAC o RM, di insiemi di punti che definiscano contorni netti rappresentabili mediante curve (ad esempio spezzate, b-spline, etc.), che costituiranno a loro volta le curve di livello del solido (porzione di vaso sanguigno o di parte ossea) da rappresentare e prototipare.

2) apprendimento dell'uso delle librerie di modellazione Geometrica Boundary OpenCascade (OC), un vasto e potente pacchetto di librerie grafiche *open source* (ovvero accessibili ed utilizzabili liberamente in quanto non coperte da diritti) scritte in C++. Il gruppo GEMMS ha infatti individuato in questo software una risorsa importante per la realizzazione del modellatore e del visualizzatore delle rappresentazioni 3D delle parti anatomiche da prototipare. Le librerie OC - peraltro già utilizzate dal gruppo Gemms nei lavori [2], [3] - verranno usate principalmente per ricostruire le frontiere (boundary) delle parti anatomiche in esame, attualmente vascolari ed in futuro anche ossee, a partire dai risultati della segmentazione.

Riguardo il punto 2., esiste una ulteriore direzione di analisi: e cioè, valutare la possibilità di determinare le sezioni e gli algoritmi di riempimento con metodi statistici (raycast statistico).

Elenco sintetico delle attività previste nei prossimi mesi:

- miglioramento delle prestazioni modellatore didattico;
- procedura per esportare in STL lo schema CSG;
- Gestire l'intera pipeline (CSG -> STL -> Produzione);
- approccio ai problemi di ricostruzione topologica;
- acquisizione di conoscenze di tecniche di segmentazione;
- studio del software OpenCascade;